Research Paper

Numerical Modelling of Thermal Stratification in Dam Reservoir Using CE-QUAL-W2 Model (Case study: Yamchi Dam)

Amin Esmaeilzadeh Hanjani[1], Mahdi Sarai Tabrizi[2]*, Hossein Babazadeh[3]
1. Former M.Sc. Student of Water Engineering and Sciences, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: 2022/11/20
Revised: 2022/07/15
Accepted: 2022/05/20

Use your device to scan and read the article online

DOI:
10.30495/wej.2023.30480.2358

Keywords:
Thermal Stratification, Yamchi Dam, CE-QUAL-W2 Model

Abstract

Introduction: One of the effective issues on water resources quality like dam reservoirs and other water bodies is thermal stratification. For studying the stratification in reservoirs, turbulence dynamic and internal flows must be analyzed in reservoir. Because of many phenomena that effect on stratification, studying this phenomenon is possible just with use of dynamic models. In this way using numerical models beside yield measurements are unavoidable.

Methods: Due to the water usage of Yamchi dam as a drinking water and irrigation, studying the water quality has more importance, so in this research for studying the status of thermal stratification of Yamchi dam, modeling of temperature with CE-QUAL-W2 software in one year period from (May, 2015) until (April, 2016) was done. The value of observed temperature from various points of the reservoir were compared with modeled data and with the results of modeled data, variation trend of the stratification phenomena in Yamchi dam was studied.

Findings: In this research, the value of the observed temperature was in good agreement with modeled data. The results showed that the stratification phenomena happen in reservoir and lasts about 4 months in the year. This phenomenon begins at the late May and improves in July and reaches its peak in August. At last, it would end in early September. From the September due to decrease of the temperature, stratification in the reservoir is declined and Turbulence is also seen in Autumn and Winter. This turbulence continues until late May.

Citation: Esmaeilzadeh-Hanjani A, Sarai-Tabrizi M, Babazadeh H. Numerical Modelling of Thermal Stratification in Dam Using CE-QUAL-W2. Water Resources Engineering Journal. 2023; 16 (58): 101- 114.

***Corresponding author:** Mahdi Sarai Tabrizi
Address: Dept. of Water Engineering and Sciences, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
Tell: +989125900747
Email: m.sarai@srbiau.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The population growth and Increasing water demand for various uses and needs for accessing to the water resources with appropriate quality made the necessity to implement water quality management plans. Lack of attention to the quality of the released water from the dams can cause some problems and sometimes lead to irreversible detrimental occurrences on the environment. Therefore, the study of reservoir water quality, using field measurements or numerical modeling could be vital to the operation of dam reservoirs. One of the effective issues on water resources quality like dam reservoirs and other water bodies is thermal stratification. For studying the stratification in reservoirs, turbulence dynamic and internal flows must be analyzed in reservoir. Because of many phenomena that stratification has an effect on, studying this phenomenon is possible just with use of dynamic models. In this way using numerical models beside yield measurements are unavoidable. Nowadays, many models have been developed to simulate hydrodynamic and water quality of the water bodies. Among these models, CE-QUAL-W2, a two-dimensional width-averaged model, has been extensively used as a commercial model all around the world. In this paper, thermal stratification in Yamchi dam is modeled with the help of mentioned model and the results shows that Yamchi reservoir is a monomictic reservoir.

Materials and Methods

Yamchi dam is one of the dams in the northwestern of Iran which was constructed on the Balkhlichai River, 25Km west of Ardebil city. The Yamchi dam constructed to supply water for drinking and agriculture uses (irrigation). In this study, the CE-QUAL-W2 model was selected for the thermal simulation. The required data to run the model can be divided into six categories including, geometric data, initial conditions, boundary conditions, hydraulic parameters, kinetic parameters and calibration data. After inputting the bathymetry file, in a process of trial and error and by using the real elevation- area chart, the geometry of the reservoir was calibrated. Then the observed water surface level in the reservoir was compared with corresponding simulated water surface level data. After geometry and surface water calibration and making other input files, the calibration of the quality stratification of the reservoir was needed to be done. Since this model included a large number of calibration coefficients, the model calibration is a time-consuming process. In the present study, the observed data of Yamchi dam reservoir, from May 2015 until April of 2016 were used to construct the model.

Findings

The absolute mean error of calibration calculated by comparing the actual temperature data and observed temperature data was 0.458 in this research, indicating that the value of the observed temperature was in good agreement with modeled data. The results show that the stratification phenomena happen in reservoir and lasts about 5 months in the year. This phenomenon begins at the late May and improves in July and reaches its peak in August. At last, it would end in early September. From the September due to decrease of the temperature, stratification in the reservoir is declined and Turbulence is also seen in Autumn and Winter. This turbulence continues until late May.

Discussion

Based on the results from modeling, it has been determined that the Yamchi Dam has a thermal stratification period. The presence of this layering in the reservoirs could cause the organic matter and sedimentation of sediments to gradually increase in the bottom of the reservoir which would then decrease the dam's life span and more

filtration to use the dam's water would be needed.

Conclusion

From the view point of stratification, Yamchi dam is in the case of Thermal Monomictic reservoirs. In these kind of reservoirs with the beginning of the spring and energy absorption, thermal stratification begins. In a way that in the mid-summer there would be a severe stratification and this stratification will continue until the end of summer. In Fall by a gradual decrease of the temperature the mentioned stratification starts to fade away so that in winter and early spring the reservoir is in complete turbulence. As for the suggestion, it is best to Reduce the water stay time in the reservoir by a relatively quick discharge.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Amin Esmaeilzadeh Hanjani, Mahdi Sarai Tabrizi, Hossein Babazadeh.
Methodology and data analysis: Amin Esmaeilzadeh Hanjani, Mahdi Sarai Tabrizi, Hossein Babazadeh.
Supervision and final writing: Mahdi Sarai Tabrizi, Amin Esmaeilzadeh Hanjani, Hossein Babazadeh.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 (مطالعه موردی: سد یامچی)

امین اسمعیل‌زاده هنجنی[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۲*]، حسین بابازاده[۳]

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته علوم و مهندسی آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳. استاد تمام گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰
تاریخ داوری: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI: 10.30495/wej.2023.30480.2358

واژه‌های کلیدی:
لایه‌بندی حرارتی، سد یامچی، مدل CE-QUAL-W2.

چکیده

مقدمه: یکی از مسائل تاثیرگذار بر کیفیت منابع آبی مانند مخازن سدها و دیگر پیکره‌های آبی لایه‌بندی حرارتی می‌باشد. به‌منظور بررسی پدیده لایه‌بندی در مخازن سدها بایستی به آنالیز دینامیک اختلاط و جریان‌های داخلی در مخزن پرداخت. باتوجه به تاثیر پدیده‌های مختلف در ایجاد لایه‌بندی، بررسی این پدیده در مخازن سدها از طریق مدل‌های دینامیکی امکان‌پذیر است. بنابراین از مدل‌های عددی در کنار اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده می‌شود.

روش: از آب مخزن سد یامچی برای تامین آب شرب محدوده استفاده می‌شود، بنابراین مطالعات کیفیت آب این مخزن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه در این پژوهش برای شناخت شرایط لایه‌بندی آب مخزن سد یامچی، شبیه‌سازی دمای آب با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 در یک دوره ۱ ساله از اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۴ تا فروردین‌ماه سال ۱۳۹۵ انجام شده است. همچنین نتایج بدست آمده توسط مدل با مقادیر دمای اندازه‌گیری شده در نقاط مختلف مخزن مقایسه شدند و با استفاده از این نتایج پدیده لایه‌بندی حرارتی در مخزن شبیه‌سازی و مطالعه شده است.

یافته‌ها: در پژوهش حاضر مقادیر دمای اندازه‌گیری شده و نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل از تطابق مناسبی برخوردار بودند. نتایج نشان دهنده‌ی یک دوره لایه‌بندی حرارتی تابستانه در مخزن سد است که حدود چهار ماه از سال به طول می‌انجامد. این پدیده از خردادماه آغاز و در تیر شدت گرفته و در مردادماه به اوج خود می‌رسد، در نهایت تا اواسط شهریور ادامه دارد. از اواسط شهریور با کاهش دما لایه‌بندی حرارتی تضعیف شده و در فصل‌های پاییز و زمستان شاهد اختلاط در مخزن هستیم. این اختلاط تا اواخر اردیبهشت‌ماه ادامه دارد.

نتیجه‌گیری: از لحاظ لایه‌بندی، مخزن سد یامچی در دسته مخازن مونومیکتیک گرم قرار دارد. در این مخازن با شروع فصل بهار و جذب انرژی، شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی آغاز می‌گردد. به شکلی که در اواسط فصل تابستان شاهد لایه‌بندی شدیدی خواهیم بود و این لایه‌بندی تا پایان تابستان ادامه خواهد داشت. به تدریج با شروع فصل پاییز و کاهش دمای محیط لایه‌بندی تضعیف می‌شود، به‌گونه‌ای که مخزن سد بخش عمده‌ای از زمستان و اوایل بهار را در شرایط اختلاط کامل به سر می‌برد. این لایه‌بندی به صورت یک چرخه سالانه مجدداً از اواسط و یا انتهای بهار شروع به شکل‌گیری می‌کند.

* **نویسنده مسئول:** مهدی سرائی تبریزی
نشانی: تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم کشاورزی و صنایع غذایی، گروه علوم و مهندسی آب
تلفن: ۰۹۱۲۵۹۰۰۷۴۷
پست الکترونیکی: m.sarai@srbiau.ac.ir

مقدمه

امروزه مخازن سدها به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آبی تلقی می‌شوند که برای اهداف متفاوتی از جمله تأمین آب شهری، کشاورزی، آبیاری و موارد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از جنبه‌های مهم پیشبینی اثرات زیست‌محیطی احداث یک سد، پیشبینی کیفیت آب مخزن و جریان خروجی از مخزن پس از ساخت و بهره‌برداری می‌باشد. بنابراین اطلاعات جامع و دقیق در خصوص کیفیت مخازن سدها می‌تواند عامل مهمی در سیاستگذاری‌های کلان باشد. فرآیندهایی نظیر لایه‌بندی حرارتی در مخازن سدها موجب افت شدید کیفیت آب و عدم تأمین حد مطلوب کیفیت برای مصارف مختلف می‌گردد و همچنین حیات آبی اکوسیستم پایین‌دست را با خطر مواجه می‌کند (۷ و ۱۸). به منظور بررسی پدیده لایه‌بندی در مخازن سدها بایستی به آنالیز دینامیک اختلاط و جریان‌های داخلی در مخزن پرداخت. باتوجه به تاثیر پدیده‌های مختلف در ایجاد لایه‌بندی، بررسی این پدیده در مخازن سدها از طریق مدل‌های دینامیکی امکان‌پذیر است. بنابراین از مدل‌های عددی در کنار اندازه‌گیری‌های میدانی استفاده می‌شود. برای شناخت بهتر فرایند لایه‌بندی پژوهش‌های بسیاری در داخل و خارج از کشور روی سدها و دریاچه‌ها انجام شده است (۱۰). ما و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی به بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد کوریس در قبرس توسط مدل دو بُعدی، کیفی CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج نشان داد که این مخزن در اغلب طول سال دارای لایه‌بندی حرارتی بوده و در اوایل بهمن اختلاط در مخزن رخ می‌دهد که پارامترهای هواشناسی به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر شروع اختلاط در مخزن تأثیرگذار هستند. آن‌ها در ادامه، اثر آبگیری انتخابی را بر روی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد با تعریف سناریوهای برداشت آب از ترازهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و بدین نتیجه دست یافتند که طرح‌های مختلف برداشت آب نتوانست بر روی الگوی لایه‌بندی مخزن در طول سال تأثیری داشته باشد که علت آن حجم برداشت آب نسبتاً کم از سد بود. با این حال خروج آب از لایه‌های عمیق‌تر توانست انتقال حرارت از سطح به عمق را تسهیل بخشیده و باعث عمیق‌تر شدن رولایه گردد (۸). چای و همکاران (۲۰۱۴) شبیه¬سازی مخزن هیهه در شهر ژیان کشور چین را از نظر مشخصات آلودگی در اثر لایه‌بندی حرارتی مورد مطالعه قرار دادند و بدین نتیجه دست یافتند که این مخزن، لایه¬بندی حرارتی ثابتی داشته و در تابستان لایه‌های پایینی فاقد اکسیژن می¬باشندکه عمده مشکلات مخزن از نظر کیفی ناشی از آزادسازی آلاینده از رسوبات است (۳). ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و شوری در مخزن سد بافت را با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که لایه‌بندی حرارتی در ۹ ماه از سال رخ می‌دهد که این امر از آوریل شروع و در اوت و سپتامبر به اوج خود می‌رسد نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین شوری و درجه حرارت وجود دارد (۴). ثابتی و همکاران (۲۰۱۷) به شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و شوری سد ماملو با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که مخزن در تابستان و اختلاط عمودی در فصل زمستان، شیب تابشی را تجربه خواهد کرد. همچنین بیان کردند که لایه‌بندی حرارتی و شوری در یک زمان، غالب می‌شوند. همچنین در تابستان، لایه‌بندی حرارتی کاهش و شدت دمایی افزایش می¬یابد (۱۴). رحیمی موقر و همکاران (۲۰۱۹) به مدل‌سازی شرایط دمایی، غلظت اکسیژن محلول و کل جامدات محلول (TDS) در مخزن سد شهید رجایی واقع در استان مازندران پرداختند. همچنین، تاثیر کاهش TDS ورودی به مخزن را تحت سناریو اول (کاهش ۲۰٪ TDS ورودی در هر دو شاخه ورودی) سناریو دوم (کاهش ۲۰٪ TDS ورودی در شاخه اصلی ورودی) و شرایط کیفی مخزن را با توجه به شاخص IRWQIsc بررسی کردند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی مدلسازی مطلوب پارامترهای ذکرشده با خطای مقبول هست و شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان دادند کاهش مقدار TDS در سناریو اول و دوم به ترتیب باعث کاهش ۲۰ و ۱۴,۲ درصد در مقدار حداکثری TDS و کاهش ۱۹,۴ و ۱۳,۴ درصد در مقدار حداقلی TDS در مخزن سد یادشده می‌شود. در ادامه، بررسی‌ها با شاخص IRWQIsc نشان داد کیفیت آب مخزن سد رجایی در شرایط نسبتاً خوب قرار دارد (۹). کیانی صدر (۱۳۹۶) در پژوهشی شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول سد گرشا واقع در استان کرمانشاه را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار داد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که لایه‌بندی حرارتی در فصل تابستان ایجاد می‌شود و در دی‌ماه مخزن از نظر تغییرات DO تقریباً به حالت اختلاط کامل در می‌آید. غلظت اکسیژن محلول در ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد در سطح آب به‌شدت افزایش می‌یابد. این امر به‌علت فتوسنتز جلبک‌ها در این ماه‌ها می‌باشد. کم‌ترین اکسیژن محلول در زیر لایه معادل ۰ میلی‌گرم در لیتر در ماه دی و آذر رخ می‌دهد و بیش‌ترین اکسیژن محلول در سطح آب در ماه اردیبهشت برابر ۱۰/۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد (۶). کاوه و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی شرایط لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی سد ایلام واقع در استان ایلام پرداختند. نتایج حاصل، نشان‌دهنده‌ی وجود لایه‌بندی تابستانه است. این لایه‌بندی با گرم شدن هوا در فصل بهار آغاز و در ماه ژوئیه به پایدارترین حالت خود می‌رسد و با شروع روند کاهشی دما در مخزن در فصل پاییز، شاهد اختلاط در فصل زمستان خواهیم بود و همچنین، براساس معیارهای (والن‌وایدر و کرس) و (نووتنی و اولم) مخزن سد ایلام در حالت نیمه مغذی و مغذی است (۷). بیرامی‌پور و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی کیفی سد بافت احداث شده بر روی رودخانه بافت واقع در استان کرمان با کمک مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. بررسی‌ها نشان داد، لایه‌بندی حرارتی در اواخر اردیبهشت‌ماه با شروع دوره‌ی گرما آغاز و در مرداد و شهریور به اوج خود می‌رسد. این لایه‌بندی تا مهرماه ادامه دارد و در ماه‌های آبان و اسفند با کاهش دمای سطح آب و سنگین شدن سطح آب، اختلاط در مخزن این سد رخ می‌دهد (۲). رضایی برندق و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی لایه‌بندی حرارتی و کیفی سد تهم زنجان با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر وجود یک دوره لایه‌بندی حرارتی در مخزن است که حدود هشت ماه از

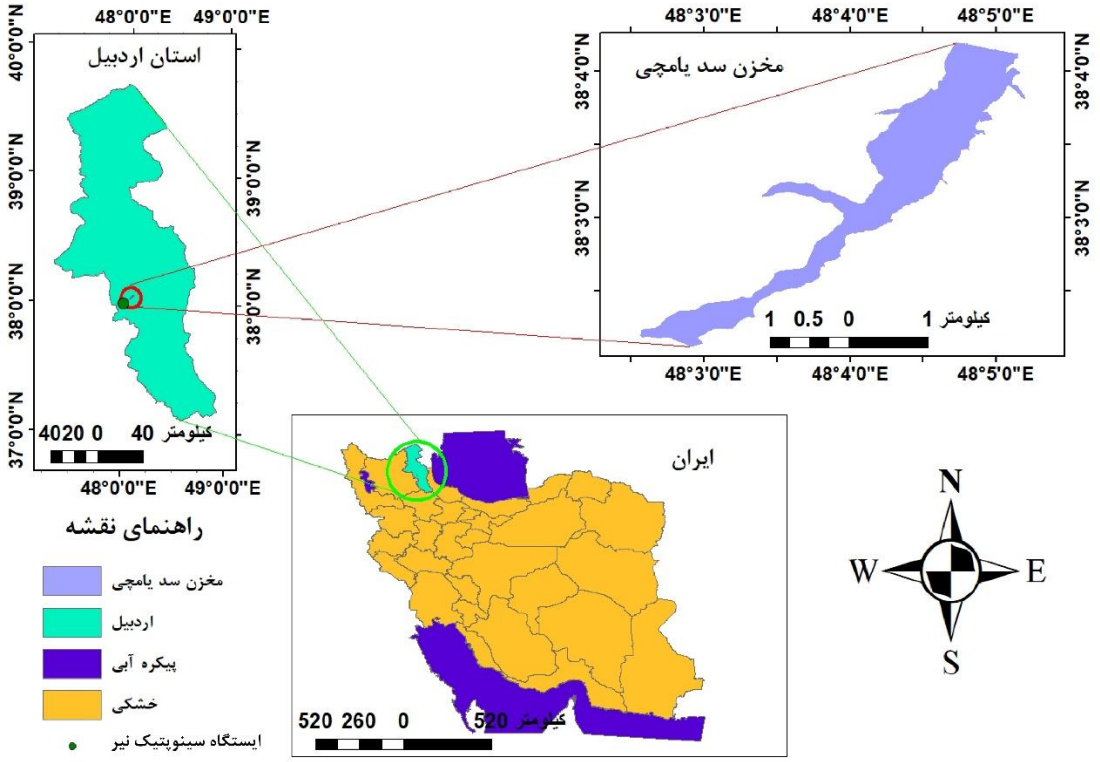
سال به طول می‌انجامد. این پدیده از اواخر فروردین‌ماه شروع و در مرداد و شهریورماه به اوج خود می‌رسد، همچنین در ماه‌های دی تا فروردین نیز اختلاط مشاهده گردید. در فصل پاییز با کاهش اختلاف دمای آب در لایه‌های بالایی و پایینی، لایه‌بندی حرارتی در مخزن تضعیف و در فصل زمستان کاملاً ناپدید گردید. همچنین نتایج، دلالت بر وجود لایه‌بندی شوری هم‌زمان با لایه‌بندی‌حرارتی در مخزن داشت (۱۰). شبان و کتابچی (۱۳۹۸) به بررسی و مطالعهٔ چرخهٔ گوگرد در مخزن سد سیمره با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند و وضعیت ترکیبات گوگردی، لایه‌بندی حرارتی و توزیع اکسیژن محلول را در قالب دو سناریو (غلظت‌های سولفات ورودی ۴۵ و ۳۸۷ میلی‌گرم بر لیتر) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دادند، با کاهش اکسیژن محلول، غلظت سولفیدهیدروژن افزایش می‌یابد، فعل و انفعالات عمدتاً بیولوژیکی در رسوبات کف مخزن باعث رفتار چرخهٔ گوگرد می‌شوند و همچنین با افزایش غلظت سولفات در مخزن میزان احیای سولفات در مخزن افزایش می‌یابد که باعث افزایش میزان سولفیدهیدروژن در مخزن می‌شود که به‌دلیل ظرفیت محدود انحلال سولفیدهیدروژن در آب، این ماده به‌صورت حباب از آب خارج می‌شود (۱۲). حیدرزاده و نیساری تبریزی (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های کیفی و هواشناسی موجود برای سد درحال احداث میمه در استان ایلام و با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی و تحلیل حساسیت میزان TDS خروجی از سد پرداختند. نتایج نشان داد که مقدار TDS خروجی در محل دریچه در تمامی دوره ۵ ساله مورد بررسی از مقادیر مجاز تعیین‌شده توسط استاندارد فائو برای آبیاری تجاوز نموده است، همچنین نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که کیفیت آب ورودی تاثیرگذارترین عامل بر کیفیت آب خروجی از دریچه می‌باشد (۵). طلاکش و همکاران (۱۳۹۸) کیفیت آب مخزن سد کارون ۳ واقع در استان خوزستان را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهند که این مخزن دارای تنها یک دوره لایه‌بندی حرارتی بوده است، به گونه‌ای که از اواخر فروردین‌ماه شروع و در اواسط تابستان به اوج خود می‌رسد. با گذر از این پیک و ورود به فصول سرد سال، لایه‌بندی شکل گرفته به تدریج تعدیل می‌شود، به‌طوری که در اسفندماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. تغییرات اکسیژن محلول نیز سیر نزولی این پارامتر را نسبت به عمق نشان می‌دهد، به گونه‌ای که در شهریورماه مقدار اکسیژن محلول از ۷/۰۷ میلی‌گرم بر لیتر به ۴/۳۷ میلی‌گرم بر لیتر نزول می‌کند. این سیر نزولی از فروردین‌ماه شروع می‌شود و با گرم شدن آب و هوا شدت بیشتری می‌یابد. این وضعیت در نهایت باعث تولید رنگ و بوی نامطبوعی در مخزن می‌شود (۱۵). صالحی و همکاران (۱۳۹۸) کیفیت آب مخزن سد مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 که یک نرم‌افزار کارآمد در زمینه تحلیل و آنالیز کیفی آب مخازن و دریاچه‌ها می‌باشد، مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج حاصله مخزن سد مهاباد دارای یک لایه‌بندی نسبتاً قوی تابستانه است که از اواخر فروردین‌ماه شروع شده و در مردادماه به اوج خود می‌رسد، با شروع فصل پاییز و هم زمان با کاهش میزان تشعشعات ورودی به مخزن لایه‌بندی شکل گرفته نیز به سمت اختلاط پیش می‌رود به‌گونه‌ای که در آذرماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. از نظر تغییرات غلظت کل جامدات محلول (TDS) نیز می‌توان گفت که روند تغییرات نسبت به عمق یک سیر صعودی دارد، طوری که بیشینه غلظت در تمام طول سال در کف مخزن می‌باشد. تغییرات اکسیژن محلول نسبت به عمق آب در مخزن نیز سیر نزولی دارد، این تغییرات از خردادماه شروع شده و تا اواخر تابستان ادامه می‌یابد طوری‌که در این دوره از سال میزان غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه به صفر می‌رسد که این وضعیت در نهایت باعث تولید رنگ و بوی نامطبوع در مخزن می گردد(۹). شعبانی و همکاران (۱۳۹۸) برای بررسی لایه‌بندی حرارتی سد سیمره در استان ایلام از مدل CE-QUAL-W2 استفاده کردند. بر اساس اطلاعات مربوط به مدلسازی، مشخص گردیده است که سد سیمره دارای یک دوره لایه‌بندی حرارتی است. وجود این لایه‌بندی در مخازن باعث می‌شود تا به تدریج مواد آلی و رسوبات ته‌نشین شده در کف زیاد شده و در هنگام اختلاط مخزن موجب گسترش پدیده تغذیه‌گرایی می‌شود. این لایه‌بندی از اسفندماه تا دی‌ماه ادامه دارد و در پاییز به اوج می‌رسد. ضخامت لایه سطحی آب که رولایه نام دارد از ماهی به ماه دیگر متفاوت است. ضمن آنکه این تفاوت در لایه میانی یا ترموکلاین نیز در ماه‌های مختلف دیده می‌شود. ضخامت رولایه در آذرماه بیش از سایر ماه‌ها می‌باشد(۱۳). آقاجانلو (۱۳۹۹) به بررسی تغییرات کیفیت آب مخزن سد علویان واقع در استان آذربایجان شرقی بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۷ با استفاده از شاخص WQI پرداخته‌است. نتایج نشان دادند، وضعیت کیفی مخزن در سال ۱۳۹۲ در شرایط خوب قرار دارد اما در سال ۱۳۹۷ در ماه‌های خرداد الی آذر وضعیت یاد شده به فقیر و بسیار فقیر تغییر می‌کند. همچنین تنها پارامتری که در سال ۱۳۹۲ در محدوده مجاز نبوده و در سال ۱۳۹۷ مقدار آن افزایش قابل توجهی کرده پارامتر کدورت بوده است (۱). با توجه به استفاده از آب سد یامچی جهت مصارف شرب، تحقیقات در مورد زمان‌بندی رخداد لایه‌بندی حرارتی ضرورت دارد. بنابراین در مطالعه حاضر شبیه‌سازی دمای آب مخزن سد نام‌برده با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 انجام شده است. با استفاده از نتایج مدل شبیه‌سازی شده، پدیده لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد، مطالعه شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات عمومی سد یامچی

سد یامچی در ۲۵ کیلومتری شهر اردبیل در حوضه آبریز ارس در زون ۳۹ در فاصله مابین مختصاتی UTM به طول جغرافیایی ۲۴۴۱۹۱ و عرض جغرافیایی ۴۲۱۸۱۰۰ و همچنین طول جغرافیایی ۲۵۷۴۴۷ و عرض جغرافیایی ۴۲۵۲۶۷۵ قرار گرفته است. و بر روی رودخانه بالخلی‌چای از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو به‌دلیل تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه احداث گردیده است. سرشاخه‌های اصلی سد یامچی شامل نیرچای، لای‌چای می‌باشند که پس از اتصال به هم رودخانه بزرگی را تشکیل می‌دهند که بالخلی‌چای نامیده می‌شود که یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه

ارس در شمال غرب ایران بوده که در جهت جنوبی- شمالی جریان داشته و آب‌های سرشاخه‌های اصلی سد یامچی را از شرق و جنوب منطقه جمع‌آوری می‌کند. این سد با ظرفیت ۸۲ میلیون مترمکعب و حجم مفید ۸۰ میلیون مترمکعب و حجم مرده 2 میلیون مترمکعب، تیرماه سال ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسیده است. در شکل ۱ پلانی از دریاچه سد آورده شده است



شکل ۱- نمایی از مخزن سد یامچی

مدل CE-QUAL-W2

مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 یکی از مطرح‌ترین مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت منابع آب در طی دهه‌های اخیر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. کاربر می‌تواند مدل را برای رودخانه، مصب، مخازن، دریاچه‌ها و یا هر ترکیبی از آن‌ها با هر تعداد شاخه و انشعاب به‌کار برد. مدل CE-QUAL-W2، یک مدل دو بعدی (طول و عمق) هیدرودینامیکی و کیفی آب می‌باشد که دارای قابلیت‌هایی مانند، مدل‌سازی هیدرودینامیکی رودخانه و مخزن، شبیه‌سازی دما، شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب، مناسب برای شبیه‌سازی دوره‌های درازمدت، مدل‌سازی شاخه‌های فرعی متعدد در توده‌های آبی دارای هندسه پیچیده، مدل‌سازی پیکره‌های آبی متعدد متصل است. برای اجرای این مدل به داده‌های هندسی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولیکی و جنبشی و داده‌های کالیبراسیون نیاز است.

معادلات حاکم بر مدل: مدل CE-QUAL-W2 به روش تفاضل محدود معادلات متوسط گیری شده در عرض را مورد حل قرار داده، این معادلات شامل:

معادله مومنتم در جهت X:

$$\frac{\partial UB}{\partial t}+\frac{\partial UUB}{\partial x}+\frac{\partial WUB}{\partial z}=gB\sin\alpha+g\cos\alpha B\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{g\cos\alpha B}{\rho}\int_{\eta}^{z}\frac{\partial \rho}{\partial x}dz+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}+qBU_x \quad (۱)$$

معادله مومنتم در جهت Z:

$$\frac{\partial P}{\partial Z}=\rho g\cos\alpha \quad (۲)$$

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial UB}{\partial x}+\frac{\partial WB}{\partial z}=qB \quad (۳)$$

معادلات حالت:

$$\rho=f(T_w,\emptyset_{TDS},\emptyset_{SS}) \quad (۴)$$

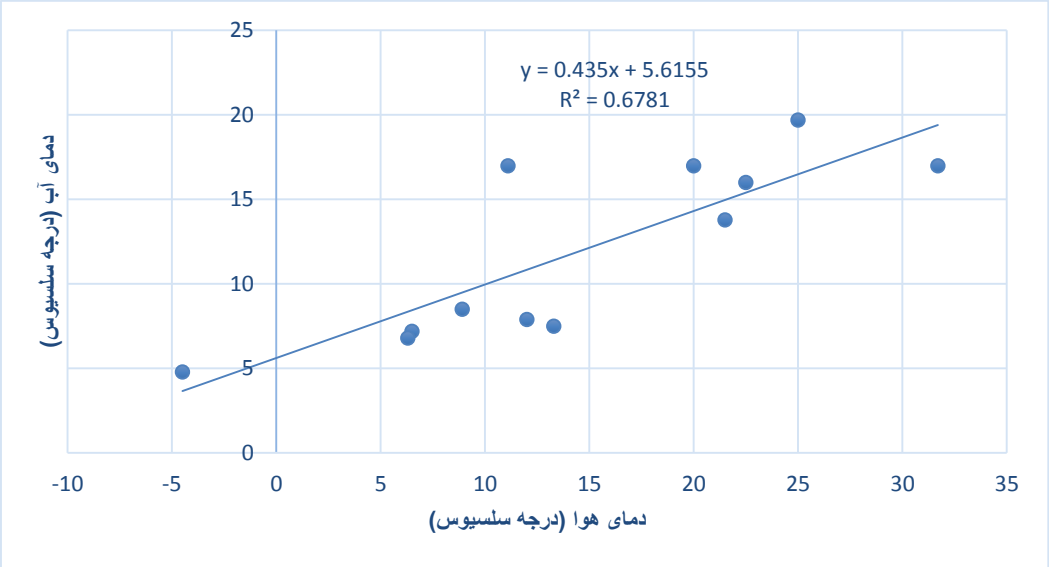
معادله سطح آزاد آب:

$$\frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\int_{\eta}^{h}UBdz-\int_{\eta}^{h}qBdz \quad (۵)$$

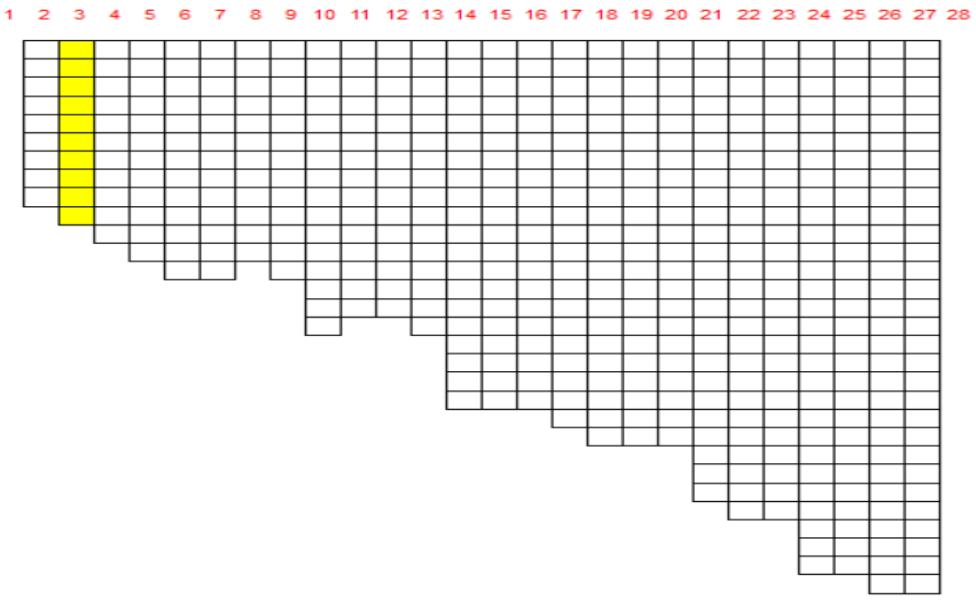
که در این معادلات، X و Z مختصات افقی و قائم، B عرض پیکره آبی، U سرعت افقی میانگین عرضی، W سرعت قائم میانگین عرضی، ρ چگالی آب، t زمان، p فشار، g شتاب ثقل، q دبی ورودی و خروجی، α شیب کف پیکره آبی، Dz و Dx ضرایب پخش حرارت و اجزا در جهت های X و Z، τ_{xx} و τ_{xz} و تنش برشی آشفته در جهت X و Z ، β_η عرض سطح آب که با زمان و مکان متغیر می‌باشد، η محل سطح آزاد آب و h عمق می‌باشد. در معادله حالت نیز چگالی تابعی از Tw دمای آب، $\emptyset_{TDS}$ غلظت مواد جامد محلول و $\emptyset_{SS}$ غلظت مواد جامد معلق می‌باشد (۱۶).

در پژوهش حاضر، برای بررسی لایه‌بندی حرارتی داده‌های هواشناسی لازم برداشت شده در ایستگاه سینوپتیک نیر (نزدیک‌ترین ایستگاه به مخزن سد یامچی) از سازمان هواشناسی کشور و دیگر داده‌ها از جمله دمای آب ورودی، از شرکت مادر تخصصی مدیریت منابع آب ایران تهیه گردیده است.

پس از وارد کردن تمام ورودی‌های مدل و اجرا و واسنجی آن در دوره مشخص شده‌ی یک‌ساله مقادیر پروفیل‌های دما مشاهداتی با مقادیر شبیه‌سازی شده مقایسه می‌گردد و نتایج مستخرج از مدل در لایه‌های مختلف مخزن ارائه خواهد شد. لازم به ذکر است که با توجه به عدم وجود داده‌های کافی از پارامتر دمای آب ورودی به مخزن و وجود یک رابطه معنادار بین پارامتر ذکر شده و دمای هوا (شکل ۲) با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک نیر دمای ورودی به مخزن به عنوان ورودی برای دوره‌ی شبیه‌سازی مدنظر استخراج شده است.



شکل ۲_ رابطه دمای آب ورودی- دمای هوا در ایستگاه سینوپتیک نیر



شکل ۵- نمایی از تقسیمات مخزن در نرم‌افزار CE-QUAL-W2

زمان شبیه‌سازی

زمان شبیه‌سازی مدل یک دوره یکساله از ۱۰ اردیبهشت ماه ۱۳۹۴ تا ۲۰ فروردین‌ماه ۱۳۹۵ در نظرگرفته شده است.

هندسه مخزن

پیکره آبی مورد مطالعه (مخزن سد یامچی)، در این شبیه‌سازی به ۲۸ مقطع طولی با فاصله‌ی ۲۰۰ متر و ۳۲ لایه در جهت قائم به ضخامت ۲ متر تقسیم شده است (شکل ۵).

واسنجی مدل

واسنجی مدل در سه مرحله انجام می‌شود، واسنجی هندسه مخزن، واسنجی تراز سطح آب و واسنجی دما و کیفیت (غلظت پارامترهای کیفی). در این پژوهش، با توجه به برداشت ماهانه پارامتر دما داخل مخزن سد یاد شده از داده‌های ماه‌های تیر، شهریور، آبان، دی، اسفند برای واسنجی و از داده‌های ماه‌های دیگر برای صحت‌سنجی استفاده شده است. پس از واسنجی مدل، برای سنجش خطا، بین داده‌های مشاهداتی و پیشبینی شده از معادله‌ی (۶) ، معیارهای میانگین خطای مطلق (AME) و معادله‌ی (۷) ، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) استفاده می‌شود (واحد این دو معیار مشابه با واحد متغیر وابسته است (۱۷).

$$AME = \frac{\sum_{i=1}^{n}|x_p^i - x_o^i|}{n} \qquad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_p^i - x_o^i)^2}{n}} \qquad (۷)$$

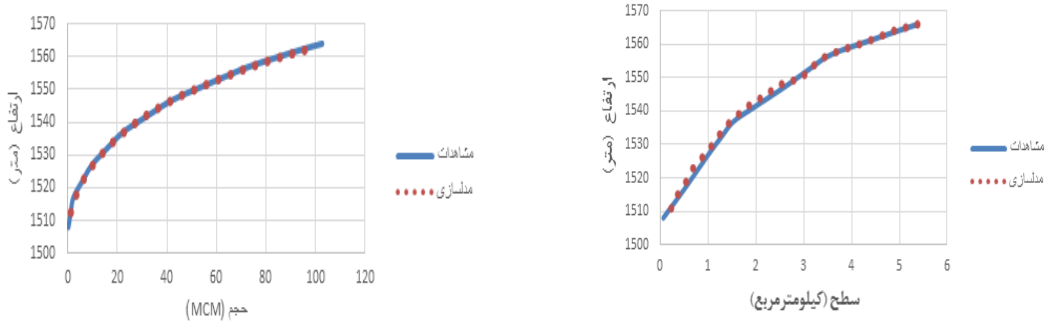
در معادلات بالا n تعداد کل داده‌ها می‌باشد. x_p^i و x_o^i به ترتیب مقادیر داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی هستند.

بحث و نتیجه‌گیری

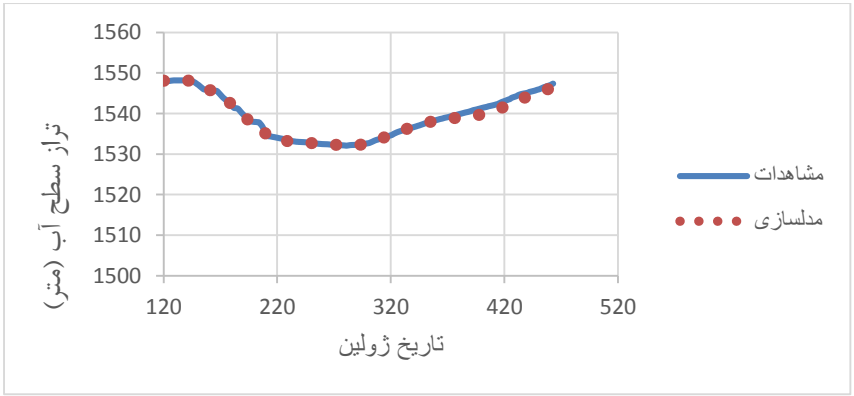
نتایج واسنجی

مرحله اول، واسنجی هندسه مخزن است. برای واسنجی هندسی مخزن، با توجه به نمودارهای مشاهداتی و مدلسازی شده‌ی حجم_ سطح_ ارتفاع، حجم و سطح مشاهداتی را با حجم و سطح شبیه‌سازی شده توسط مدل را در ارتفاع‌های مشخص مقایسه خواهیم کرد. برای انجام این مرحله با تغییر در عرض سگمنت‌ها تلاش بر تدقیق داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده خواهیم کرد. (شکل۳) نشان‌دهنده‌ی این مقایسه‌ها میان نمودارهای حجم- ارتفاع و سطح- ارتفاع مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هستند. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد.

مرحله دوم، واسنجی تراز سطح آب است. تراز سطح آب شبیه‌سازی شده در طول دوره‌ی شبیه‌سازی باید مشابه با تراز سطح آب مشاهداتی باشد. برای واسنجی تراز آب از برنامه جانبی (waterbal_ivf37.exe) استفاده خواهد شد. (شکل ۴) نشان دهنده‌ی مقایسه داده‌های مشاهداتی دریافت شده از شرکت مدیریت منابع آب ایران و داده‌های شبیه‌سازی شده تراز سطح آب در دوره شبیه‌سازی توسط مدل است که تطابق بسیار خوبی را به نمایش می‌گذارد. در ادامه، جدول (۱) نشان دهنده‌ی خطای محاسبه شده توسط برنامه (waterbal_ivf37.exe) می‌باشد که طبق نتایج به‌دست آمده، واسنجی به شکل مناسبی انجام شده است.



شکل ۳- منحنی‌های حجم_ ارتفاع و سطح_ ارتفاع واقعی و شبیه‌سازی شده سد یامچی

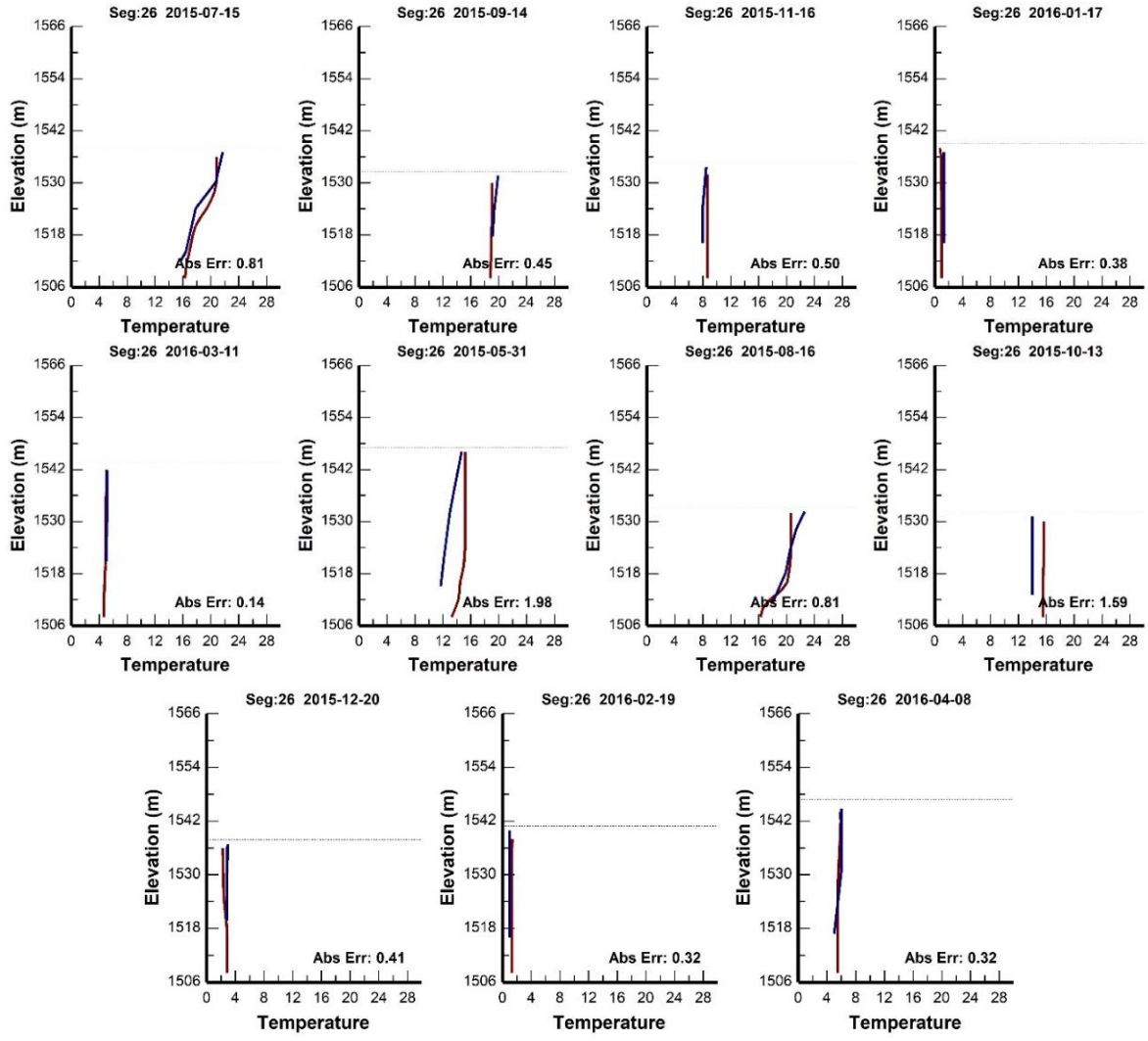


شکل ٤- منحنی تراز سطح آب واقعی و شبیه‌سازی شده سد یامچی

جدول ۱- خطاهای محاسباتی توسط برنامه (waterbal_ivf37.exe)

RMS Error (متر)	Absolute ME (متر)
۰,۶۳	۰,۴۱

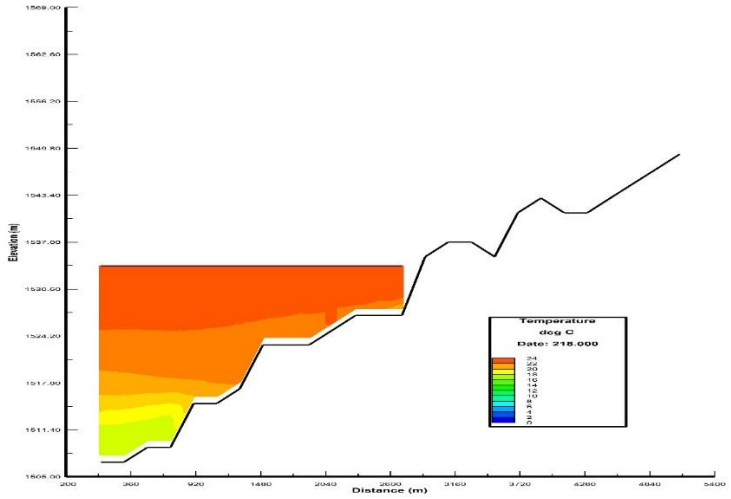
مرحله سوم، در این مرحله (مرحله سوم واسنجی) با استفاده از پروفیل‌های دما مستخرج شده از مدل در دوره مدنظر در برنامه W2_post نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی برداشت شده داخل سد مقایسه خواهند شد. در (شکل ۶) نتایج پروفیل‌های شبیه‌سازی (منحنی‌های قرمز رنگ) و مشاهده شده (منحنی‌های آبی رنگ) در یکی از عمیق‌ترین بخش‌های مخزن سد یامچی (مقطع ۲۶) مقایسه شده‌اند. در این شکل، برای نشان دادن میزان خطا بین نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج مشاهداتی از پارامتر آماری AME استفاده شده است. در جدول (۲) میزان میانگین مطلق خطا در طول دوره شبیه‌سازی در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی آمده است که نشان‌دهنده‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مناسب مدل است. با توجه به جدول (۲) در بررسی‌ها توسط معیار AME خطا در دوره صحت‌سنجی بیش‌تر است که به دلیل بیش‌تر بودن مقدار خطای محسباتی در ماه‌های خرداد و مهر می‌باشد که می‌تواند به دلایلی از جمله خطای انسانی در برداشت داده باشد. نتایج سایر پژوهش‌های صورت گرفته با کمک مدل CE-QUAL-W2 بر روی سدهای دیگر، ازجمله کیانی صدر (۱۳۹۶)، رضایی برندق و همکاران (۱۳۹۷) و شعبانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز کارآمد بودن مدل یاد شده را در بررسی دمایی مخازن سدها و همچنین دقت بالای پژوهش حاضر را نشان می‌دهد (۶، ۱۰ و ۱۳).



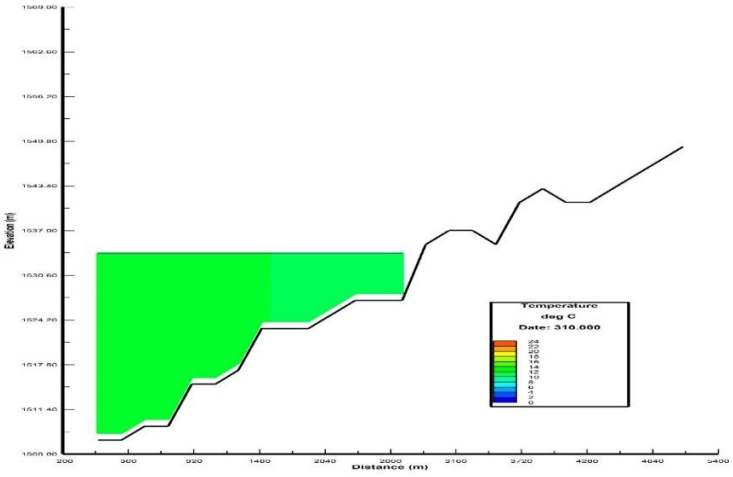
شکل ٦- مقایسه داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی دما در دوره‌ی شبیه‌سازی شده

جدول ۲- میزان میانگین مطلق خطا در طول دوره شبیه‌سازی در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی

AME (درجه سلسیوس)	دوره شبیه‌سازی
۰/۴۵۸	واسنجی
۰/۹۰۵	صحت‌سنجی



شکل ۷- الگوی لایه‌بندی حرارتی در اواسط مرداد (تاریخ: ۱۳۹٤/٥/۱۵)



شکل ۸- الگوی لایه‌بندی حرارتی در اواسط آبان (تاریخ: ۱۳۹٤/۸/۱۵)

شرایط لایه‌بندی حرارتی مخزن

با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی به کمک مدل CE-QUAL-W2، مخزن سد یامچی دارای لایه‌بندی تابستانه است. این لایه‌بندی از ابتدای خردادماه آغاز شده و در مردادماه به اوج خود می‌رسد (شکل ۷) و تا اواسط شهریورماه ادامه دارد. با سرد شدن هوا و ورود به فصل پاییز لایه‌بندی تضعیف و از بین می‌رود (شکل ۸). در فصل‌های پاییز و زمستان و همچنین در ماه فروردین و تا اواخر اردیبهشت ماه شاهد اختلاط کامل در مخزن هستیم.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش شناخت وضعیت لایه‌بندی حرارتی سد یامچی اردبیل با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی روند تغییرات پارامتر دما، الگوی لایه‌بندی حرارتی در محل سد مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج ارائه شده، مخزن سد یامچی دارای یک لایه‌بندی حرارتی تابستانه می‌باشد. این لایه‌بندی، تقریبا چهار ماه به طول می‌انجامد و از خردادماه با افزایش

دما شروع شده و در تیر شدت گرفته و در ماه مرداد به اوج خود می‌رسد و تا اواسط شهریور ادامه دارد. از اواسط شهریور با کاهش دما از شدت لایه‌بندی کم شده و در فصل پاییز شاهد اختلاط کامل هستیم در فصل زمستان همچنان این اختلاط ادامه دارد (لایه‌بندی ناپدید می‌شود). با کاهش دما در ماه‌های دی و بهمن، دما آب به حدود ۱ درجه سلسیوس می‌رسد و اما در ماه اسفند، دما آب افزایش یافته و تا به بیش از ۵ درجه سلسیوس می‌رسد. با آغاز فصل بهار دما محیط افزایش یافته و تا پایان اردیبهشت‌ماه دمای آب تا به ۱۳ درجه سلسیوس می‌رسد اما همچنان مخزن دارای اختلاط است. در خرداد با افزایش دمای رولایه، شرایط برای ایجاد لایه‌بندی حرارتی مهیا می‌گردد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: امین اسمعیل‌زاده هنجنی، مهدی سرائی تبریزی و حسین بابازاده.

روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: امین اسمعیل‌زاده هنجنی، مهدی سرائی تبریزی، حسین بابازاده ؛

نظارت و نگارش نهایی: مهدی سرائی تبریزی، امین اسمعیل‌زاده هنجنی و حسین بابازاده.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

References

1. Aghajanloo, k., (2021). Assessment of temporal variations of Alavian dam reservoir quality using WQI. 19th Iranian Hydraulic Conference, Mashhad, Iran. 15-16 February.
2. Beiramipoor, S., Qaderi, K., Haghjuie, H., Rahimpoor, M., (2018). 'Reservoir water quality management of Baft dam through selected drainage from the dam outlet locations using the model CE-QUAL-W2', Irrigation & Water Engineering, 8(31), pp.237.
3. Chai, B., Li, Y., Huang, T., and Zhao, X. 2014. Pollution characteristics of thermally-stratified reservoir: A case study of the Heihe reservoir in Xian city, China. J. Chem. Pharm. Res. USA. 6: 7. 1231-1240.
4. Ebrahimi, M., Jabbari, E. and Abbasi, H. (2015). Simulation of thermal stratification and salinity in dam reservoir using CE-QUAL-W2 software (Case study: Abaft Dam). J. Civil Engine. Urban. 5: 1. 07-11.
5. Heidarzadeh, N., Neisari Tabrizi, N., (2019). 'Modeling and sensitivity analysis of water quality in Meymeh reservoir using CE-QUAL-W2 Software', Journal of Environmental Sciences and Technology, 21(5), pp.47-64.
6. Kiani, S., (2017). 'Simulation of thermal stratification and concentration of the solvent oxygen using model CE QUAL W2 (Case Study: GARSHA Dam)', Journal of Wetland Ecobiology, 9(2), pp.39-52.
7. kaveh, M., moridi, A., Shoorian, M., (2018). 'Solutions for Improving Water Quality in Dams' Reservoirs (Case Study: Ilam Reservoir)', Water Engineering, 11(37), pp.87-97.
8. Ma, S., Kassinos, S.C., Fatta-Kassinos, D. and Akylas, E. (2008). Effects of selective withdrawal schemes on thermal stratification in kouris dam in Cyprus. Lakes &Reservoirs: J. Res. Manage. 13: 51-61.
9. Rahimi Movaghar, M. Mirbagheri, S. Kerachian, R. (2019). Total dissolved solid and dissolved oxygen modeling, thermocline calculation and applying reservoir salinity reduction scenario in Shahid Rajaee reservoir using CE-QUAL-W2. Water Supply. 19 (2), pp.424-433.
10. Rezaei Barandagh, H. Salmasi, F. Sahebi, F. (2018). 'Water Quality and Temperature Stratification of Zanjan Taham Dam with CE-QUAL-W2 Software', Water and Soil Conservation, 25(1), pp.127-145.
11. Soltani, G., Alavy, S. (2005). Experiences obtained from studies on

quality effects of thermal stratification on few dams. In 12th Civil Engineering Student Conference, Tehran, Iran.
12. Shaban, E., Ketabchi, H., (2019). 'Simulation of Sulfur Cycle using CE-QUAL-W2 model (Case Study of Seymareh Dam Reservoir, Iran)', Iranian Water Research Journal, 13(33), pp.151 161.
13. Shabani, N., Rahmanifiroozjaee, A., Abessi, O., (2019). 'Thermal Stratification of Seymareh Dam Using Two-Dimensional, Hydrodynamic and Water Quality Model: CE-QUAL-W2', Journal of Environmental Sciences and Technology, 21(7), pp.77-87.
14. Sabeti, R., Jamali, S. and Hajikandi Jamali, H. (2017). Simulation of thermal stratification and salinity using the Ce-Qual-W2 Model (Case Study: Mamloo Dam). Engineering, Technology and Applied Science Research.7(3). 1664-1669.
15. talakesh, S., Fatahi Nafechi, R., Samadi Boroujeni, H., Mirabbasi Najafabadi, R., Khajepour, I., (2019). 'Investigation on Stratification of Temperature and Dissolved Oxygen in a Large Dam Reservoir (Case study: Karun 3 Dam)', Iranian Water Research Journal, 13(32), pp.49 57.
16. Wells, S. A. (2020) "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 4.2.2, user manual part 2, hydrodynamic and water quality model theory," Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.
17. Wells, S. A. (2020) "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 4.2.2, user manual part 4, model examples," Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.
18. Yuanning, Z., Xueping, G., Bowen, S., Chang, L., Budong, L., Xiaobo, L., (2022). 'Tracking thermal structure evolution: An objective practice in a stratified reservoir based on high-frequency measurements', Journal of Hydrology: Regional Studies, 39, 100989, ISSN 2214-5818, https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.100989